

И.Ю. Ермоленко

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

ОЦЕНКА СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И ПУТИ В ЗОНЕ РЕЛЬСОВОГО СТЫКА

Аннотация. Рассмотрены вопросы ударного взаимодействия системы «колесо-рельс» при прохождении рельсового стыка в связи с планомерным увеличением веса поездов на Восточном полигоне. Проведена оценка силового воздействия на колесо вагона в зоне рельсового стыка на основе математического моделирования при варьировании глубины стыковой неровности, скорости экипажа, жесткости подрельсового основания и величины статической осевой нагрузки.

Ключевые слова: система «колесо-рельс», рельсовый стык, колесо вагона, силовое воздействие, дефекты рельсов, тяжеловесное движение.

I.Yu. Ermolenko

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

EVALUATION OF THE FORCE IMPACT OF THE ROLLING STOCK AND THE TRACK IN THE AREA OF THE RAIL JOINT

Abstract. The issues of shock interaction of the "wheel-rail" system during the passage of the rail junction in connection with the systematic increase in the weight of trains at the Eastern training ground are considered. An assessment of the force impact on the car wheel in the area of the rail joint was carried out on the basis of mathematical modeling with varying the depth of the butt unevenness, the speed of the vehicle, the rigidity of the under-rail base and the magnitude of the static axial load.

Keywords: "wheel-rail" system, rail joint, wagon wheel, force impact, rail defects, heavy traffic.

Введение

В соответствии со Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г. [1], планируемые целевые параметры грузовых вагонов предполагают увеличение осевых нагрузок до 27-30 тс и скорость до 140 км/ч.

При движении по стыковому пути в результате ударного взаимодействия колеса и рельсового стыка происходит разрушение поверхностей катания головок рельсов вблизи стыка, образование смятий и выкрашиваний, переходящих на торцовые поверхности стыкуемых рельсов, что приводит к еще большему возрастанию ударного воздействия на колесо локомотива и вагона, особенно при увеличении скорости движения. Помимо этого, стоит отметить, что планом развития [1] также является расширение применения бесстыкового пути. Однако практика эксплуатации пути в различных геоклиматических условиях (например, Восточный полигон) и пропуском тяжеловесных поездов показывает, что количество дефектов сварных швов по коду 46.3 (смятие и износ головки в зоне сварного стыка из-за местного снижения механических свойств металла после пропуска гарантийного тоннажа), остается высоким (рис. 1).

Неровности в плане

Стыковая неровность в пути наиболее часто бывает типа «перелома» рельсовой нити и стыкового зазора больших размеров. Траектории перекатывания центра тяжести колеса по неровности такого вида имеют одинаковый характер и подобны траектории движения центра тяжести колеса при наличии ползуна [2]. Отступления от норм содержания стыка в виде вертикальных «ступенек» встречаются в основном при неправильном подборе стыкуемых рельсов по износу при их одиночной замене и сильно разболченном или совсем не оболченном стыке, что может случаться только в отдельных случаях, поэтому неровности такого вида в расчет не закладывались.

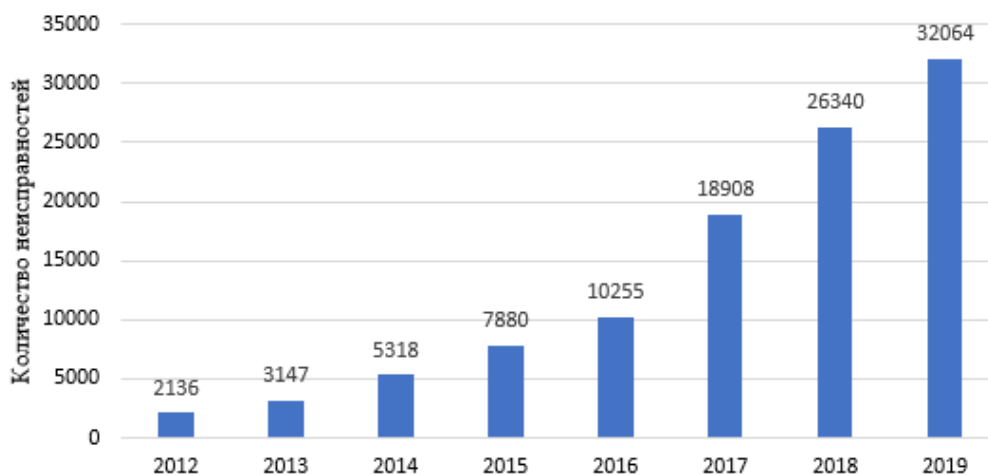


Рис. 1. Замена рельсов по дефектам сварных стыков (код 46.3)

В работах А.Я. Когана [3, 4] предложен аппарат, позволяющий определять колебания всех элементов пути и подвижного состава в вертикальной плоскости при воздействии на систему «экипаж-путь» неровностей колес и пути, а также при ударном воздействии, вызываемом проходом по пути колес с ползунами. Особенностью взаимодействия колеса и рельса в последнем случае является возможность разрыва кинематической связи, что вызывает в динамической системе переходный процесс, характеризующий явление удара. Аналогичное явление возникает при проходе стыковой неровности (рис. 2), так как происходит скачкообразное изменение положения мгновенного центра вращения колеса [5].

Для определения ударного импульса, возникающего в момент прохождения колесной парой рельсового стыка (рис. 1), с отдающего (точка a_{p1}) на принимающий (точка a_{p2}) рельс, в общем случае пользуются гипотезой А.М. Годыцкого-Цвирко [6], аналогично можно определить прохождение колесной парой короткой неровности пути

$$s(t) = mV_B = m\theta_{CT}V \quad (1)$$

где m – масса необрешоренной части вагона; V_B – вертикальная скорость ЦМ после удара; θ_{CT} – угол стыка, зависит от зазоров между концами рельсов (θ_{CT1}), дополнительного износа (θ_{CT2}) и упругой деформации в зоне рельсового стыка (θ_{CT3}), обусловленного условиями эксплуатации; V – поступательная скорость движения колесной пары.

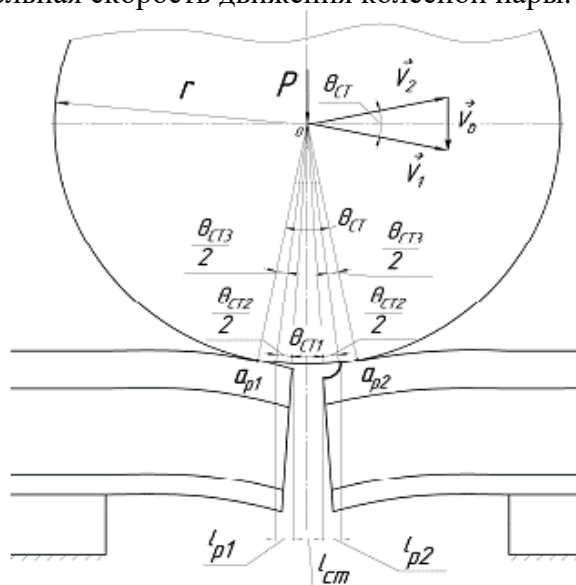


Рис. 2. Расчетная схема взаимодействия колеса и рельсового стыка

Также при расчете стоит учитывать тот факт, что вертикальная и горизонтальная жесткость рельсовых нитей в зоне стыкового соединения в 1,25-1,5 (для обычного стыка) и 1,5-1,75 (для изолирующего стыка) раза ниже, чем в промежуточных сечениях (рис. 3).



Рис. 3. Неисправности и дефекты рельсовых стыков в эксплуатации

Постановка задачи исследования

Использование частотных характеристик $W_p(i\omega)$; $W_o(i\omega)$; $W_y(0, i\omega)$ импульсных переходных функций $h(t)$ и единичных реакций системы $H(t)$ на приложение в момент времени t ускорения сближения α_o в системе «экипаж-путь» позволяет составить зависимость для определения во временной области суммарной силы в контакте колеса и рельса

$$P_d(t) = P_{ст} - \omega_o^2 r H(t) + \omega_o^2 l h(t - T) + \omega_o^2 r H(t - 2T) \quad (2)$$

где r – радиус колеса; ω_o – угловая скорость колеса.

Результаты многовариантных расчетов позволили вскрыть физическую сущность процесса перекатывания колеса по стыковой неровности при безотрывном характере движения и при отрыве колеса от рельса. Динамическое моделирование позволило также получить ряд функциональных зависимостей вида

$$P_d = f(P_{ст}); P_d = f(V); P_d = f(U); P_d = f(\delta) \quad (3)$$

где V – скорость движения; U – модуль упругости подрельсового основания; δ – глубина стыковой неровности.

В расчет закладывались следующие глубины геометрических стыковых неровностей: 0,1; 0,3; 0,6 см. При этом в расчет принимается та зона геометрической неровности в стыке, которая характеризуется наибольшими искажениями прямолинейности рельсовой нити из-за стыкового зазора, а следовательно, и низкой изгибной жесткости рельсовой нити на этом небольшом по протяжению участке, в результате чего происходят резкие деформации концов рельсов в вертикальной плоскости, приводящие к весьма высоким значениям сил из-за ударного характера взаимодействия колеса и рельса.

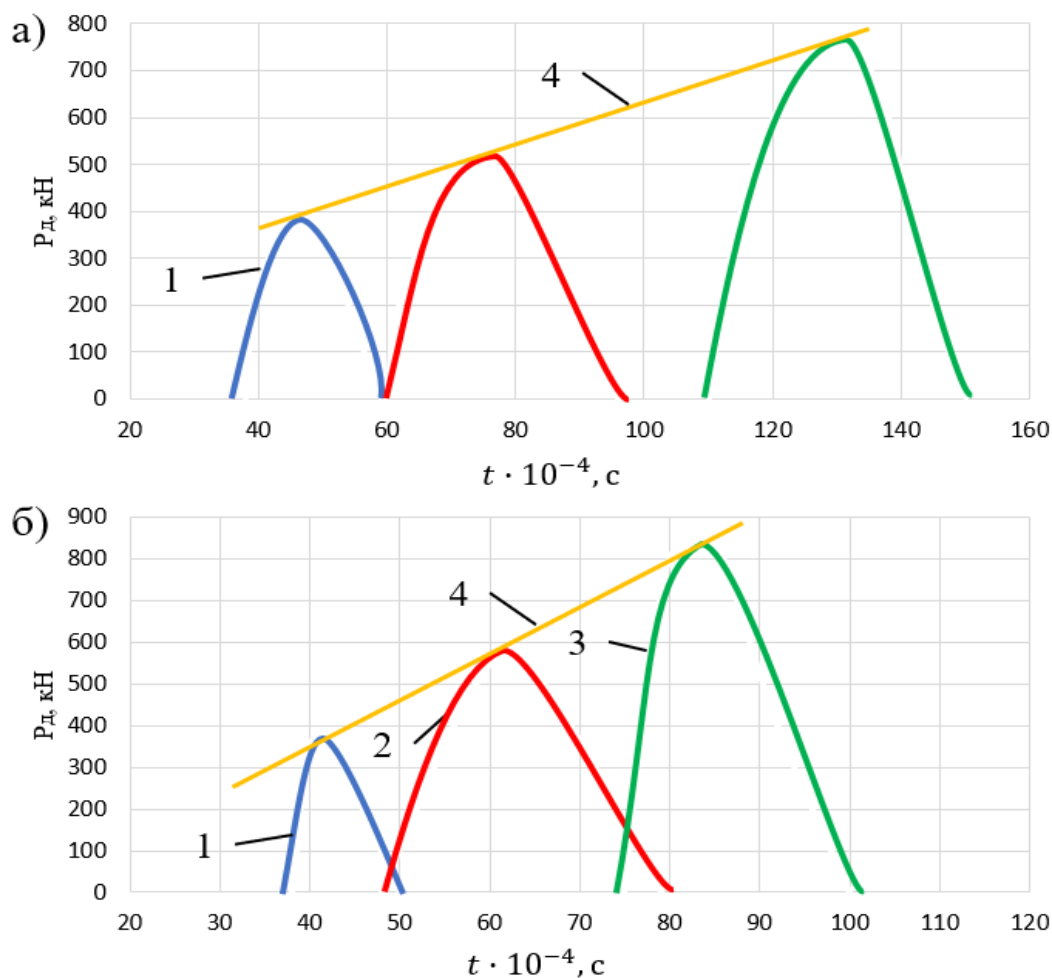
Зависимость $P_d = f(\delta)$ показывает, что при увеличении глубины стыковой неровности с 0,1 до 0,6 см вертикальная сила, вызванная ударом о принимающий конец рельса, возрастает при $V=23$ км/ч в 2,03 раза, а при $V=40$ км/ч – в 2,24 раза, то есть при увеличении скорости влияние глубины неровности становится более значительным. В то же время при одной и той же глубине стыковой неровности, но в разных скоростях наблюдается значительная разница в величине силы; выразив ее в долях, приведена в таблице 1.

Доля увеличения максимальных вертикальных динамических сил в зоне рельсового стыка, реализующих в момент удара о принимающий конец рельса

Глубина геометрической неровности в стыке δ , см	Доля возрастания силы с увеличением скорости	
	$V=23$ км/ч	$V=40$ км/ч
0,1	1,0	1,05
0,3	1,0	1,16
0,6	1,0	1,2

Как видно, наблюдается прямо пропорциональная зависимость увеличения ударных сил от возрастания скорости движения экипажа и увеличения глубины геометрической неровности в стыке. Уже при практически равном рельсе, когда глубина геометрической неровности не превышает 0,1 см, сила удара в стыке из-за низкой изгибной жесткости достигает 400 кН. Это еще раз доказывает, что в формировании сил взаимодействия в зоне стыка немалую роль играет именно динамическая неровность, возникающая из-за перелома рельсовой нити вследствие низкой изгибной жесткости стыковой конструкции.

Поскольку модель не рассчитана на определение сил взаимодействия после обезгруживания рельса большими отрицательными силами, возникающими при скоростях свыше 40 км/ч [4], для анализа сил при больших взаимодействиях сначала рассмотрим зависимости, полученные до момента отрыва колеса, но в непосредственной близости от стыкового зазора, когда влияние стыковой неровности велико и можно получить связь величины динамического воздействия в стыке с различными факторами, в данном случае – со скоростью (рис. 4).



1 – $\delta = 0,1$ см; 2 – $\delta = 0,3$ см; 3 – $\delta = 0,6$ см; 4 – $P_d = f(\delta)$;

Рис. 4. Вертикальное силовое воздействие на путь в зоне рельсового стыка в зависимости от глубины неровности:

а) при $V = 23$ км/ч; б) при $V = 43$ км/ч

Анализ зависимостей подтверждает устойчивое влияние скорости движения колеса на уровень силового воздействия в стыке и позволяет коэффициенты увеличения максимальных сил на подходах к стыковому зазору при различных скоростях по сравнению с $V=23$ км/ч (табл. 2).

Таблица 2

Увеличение максимальных сил в непосредственной близости от стыкового зазора с возрастанием скорости по сравнению с их значением при $V=23$ км/ч

Скорость, км/ч	Коэффициенты возрастания сил на подходах к стыку с увеличением скорости при глубине стыковой неровности (см)		
	0,1	0,3	0,6
40	1,05	1,14	1,22
60	1,1	1,35	1,4
80	1,15	1,41	1,57

Сопоставление полученных коэффициентов с долей возрастания сил при увеличении скорости в зоне удара показывает, что наблюдается совпадение этих значений в интервале скоростей 23...40 км/ч.

Таким образом, согласованность доли возрастания силового воздействия в интервале 23...40 км/ч до удара на подходе к стыковому зазору и в момент удара позволяет сделать вывод об одинаковой интенсивности их возрастания на всем протяжении стыковой неровности.

Отсюда следует, что подобная закономерность будет соблюдаться и для других интервалов скоростей. Тогда по результатам этого анализа можно составить таблицу для величин ударных воздействий на принимающем конце рельса при различных скоростях и величинах стыковых неровностей (табл. 3)

Таблица 3

Максимальные вертикальные динамические силы в стыке, реализуемые в момент удара о принимающий конец рельса

Скорость движения экипажа, км/ч	Максимальная сила в момент удара (кН), при глубине стыковой неровности (см)		
	0,1	0,3	0,6
23	308	505	760
40	400	615	897
60	418	675	1064
80	437	705	1193

Таким образом, расчет прохождения колесом зоны стыковой неровности при скоростях $V=23$ км/ч (критическая скорость, при которой не происходит отрыва колеса), $V=40, 60, 80$ км/ч показал, что значительное влияние на уровень сил взаимодействия оказывает скорость движения экипажа. Фактор скорости имеет влияние при любых условиях конструктивного оформления стыка или уровня его технического состояния, усиливая динамическое воздействие при реализации больших глубин стыковых неровностей.

При анализе зависимости вертикальных динамических сил в стыке от жесткости подрельсового основания, как и в предыдущем случае, рассматриваются результаты, полученные до момента удара колеса о принимающий конец рельса, так как ударное воздействие одинаково велико при различных жесткостях подрельсового основания и осевых нагрузках, поэтому их влияние в этот момент несколько нивелируется. До момента соударения это различие более явно, тем более что силы, реализуемые в этом месте стыковой неровности, также оказывают свое влияние на повреждаемость рельсов и других элементов верхнего строения пути и выход их из строя. А для выявления влияния факторов жесткости и статического нагружения колес экипажа достаточно анализа этих сил, которые позволят обнаружить общие закономерности.

Различные варианты жесткости подрельсового основания в расчете задавались модулем упругости для пути с деревянными и железобетонными шпалами в летних условиях. Для пути с деревянными шпалами модуль упругости подрельсового основания принимался 26

МПа, а для пути с железобетонными шпалами – 100 МПа. Ограничение возможных значений жесткости подрельсового основания двумя величинами вызвано большим числом расчетных вариантов, использованных в исследовании.

По результатам расчетов был получен вывод, что динамическая вертикальная сила в зоне стыка больше при более жестком основании, причем с увеличением скорости эта разница возрастает. При скорости 23 км/ч разницы в силах, несмотря на различие модулей упругости подрельсового основания (табл. 4) не наблюдается. $t \cdot 10^{-4}$, с.

Таблица 4

Возрастание динамических сил в стыке при различной жесткости подрельсового основания

Скорость движения экипажа, км/ч	Доля возрастания динамических сил в стыке при увеличении жесткости подрельсового основания	
	$U=26$ МПа	$U=100$ МПа
23	1,0	1,0
40	1,0	1,1
60	1,0	1,15
80	1,0	1,31

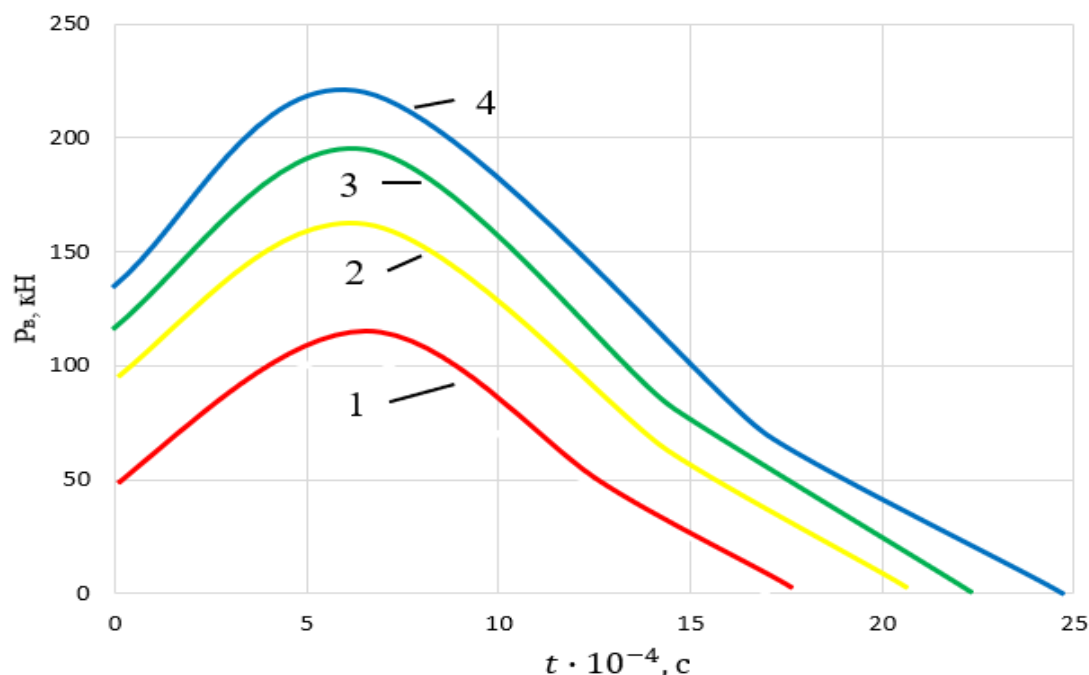
Следует отметить также уровень вертикальных сил в этой зоне стыка, который может в 1,5...1,75 раза превышать статическую нагрузку, приложенную к колесу, достигая величин, указанных в табл. 5.

Таблица 5

Уровень вертикальных динамических сил в стыке

Скорость движения экипажа, км/ч	Уровень динамических сил в стыке в зависимости от материала шпал, кН	
	дерево	железобетон
23	116,25	116,25
40	141,0	155,0
60	159,0	183,0
80	180,0	202,0

Функциональная зависимость между нагрузкой на ось вагона и вертикальной динамической силой, возникающей при движении по стыку, имеет линейный характер, выражающий прямо пропорциональную зависимость $P_d = f(P_{oc})$ (рис. 5). Максимальные динамические силы до реализации удара возрастают в соответствии с данными таблицы 6.



1 – $P_{oc} = 150$ кН/ось; 2 – $P_{oc} = 210$ кН/ось; 3 – $P_{oc} = 230$ кН/ось; 4 – $P_{oc} = 257,5$ кН/ось

Рис. 5. Вертикальная динамическая сила в зоне стыка в зависимости от величины осевой нагрузки

Возрастание динамических сил в зоне рельсового стыка при увеличении осевой нагрузки

Статическая осевая нагрузка, кН/ось	Уровень динамических сил в стыке, кН	Возрастание динамических сил по сравнению со статической нагрузкой
150,0	110,63	1,48
210,0	167,75	1,6
232,5	194,72	1,68
257,5	224,03	1,74

Заключение

Сравнивая уровни динамических сил при осевой нагрузке 150 кН/ось, 210 кН/ось и 232,5 кН/ось с уровнем сил при нагрузке, максимально разрешенной с 1985 г. – 257,5 кН/ось, нужно отметить, что эти соотношения соответственно равны 1,03; 1,34; 1,15. Таким образом, как показывает расчет, если в настоящее время средняя осевая нагрузка на сети железных дорог составляет 150 кН/ось, то повсеместное введение нагрузки до 257,5 кН, в связи с ведением тяжеловесного движения, может привести к возрастанию уровня динамических сил в стыке в два раза [7, 8].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Распоряжение Правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 877-р «Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» [Электронный ресурс] // Официальный сайт Министерства транспорта Российской Федерации. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/7/1010> (дата обращения: 17.11.2021).
2. Данилов В.Н. Расчет рельсовой нити в зоне стыка. М.: Трансжелдориздат, 1952. 144 с.
3. Коган А.Я. Расчеты железнодорожного пути на вертикальную динамическую нагрузку // Труды ВНИИЖТ / М.: ВНИИЖТ, 1973. Вып. 502. 80 с.
4. Коган А.Я., Верхотин А.А. Расчет воздействия на путь колесной пары с ползуном // Исследования возможностей повышения скоростей движения поездов / М.: Транспорт, 1984. С. 31-37.
5. Крысанов Л.Г., Шерсиянникова И.В. Экспериментальное исследование влияния жёсткости подрельсового основания на работу и взаимодействие элементов пути в зоне стыка // Сборник научных трудов ИрГУПС / Иркутск: ИрГУПС, 2002. С. 30-39.
6. Патент № 2678521 Российская Федерация. МПК В61К 9/08. Способ определения геометрических параметров стыков рельсового пути : № 2017108698 : заявл. 16.03.2017 : опуб. 29.01.2019 / Федоров Д.В., Потапенко В.С.
7. Ермоленко И.Ю. Влияние профиля пути горного участка ВСЖД на силовое взаимодействие «колесо-рельс» с учетом экспериментальных параметров вагона-лаборатории // Вестник Иркутского государственного технического университета / Иркутск, 2017. Т. 21. № 2. С. 170-180.
8. Ресельс А.П., Филатов Е.В., Ковенькин Д.А., Баранов Т.М. Влияние продольных сил в поездах на возвышение наружного рельса в кривых участках пути // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / 2020. Т. 65 № 1. С. 75-84. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.1(65).75-84.
9. Алтынников Д.С., Ковенькин Д.А. Определение поперечных напряжений в шейке рельсов в зависимости от динамических нагрузок на подходах к мостам // Системный анализ. Моделирование / 2018. Т. 60 № 4. С. 108-117. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.4(60).108-117.
10. Спиров А.В., Быков В.А. Моделирование торможения длинносоставных поездов с целью оценки безопасности движения // Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ: III научно-технический семинар / Брянск: БГТУ, 2016. С. 84-87.

REFERENCES

- 1 Order of the Government of the Russian Federation of June 17, 2008 No. 877-r "Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030" [Electronic resource] // Official website of the Ministry of Transport of the Russian Federation. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/7/1010> (date accessed: 17.11.2021).
- 2 Danilov V.N. Raschet zheleznodorozhnoy niti v zone styka [Calculation of a rail thread in the joint zone]. Moscow: Transzheldorizdat, 1952, 144 p.
- 3 Kogan A.Ya. Raschety zheleznodorozhnogo puti na vertikal'nuyu dinamicheskuyu nagruzku [Calculations of the railway track for vertical dynamic load] // Proceedings of VNIIZhT / Moscow: VNIIZhT 1973, Issue 502, 80 p.
- 4 Kogan A.Ya., Verkhotin A.A. Raschet vozdeystviya na put' kolesnoy pary s polzunom [Calculation of the impact on the path of a wheel pair with a slide] // Studies of the possibilities of increasing the speed of train movement. Moscow: Transport, 1984, P. 31-37.
- 5 Krysanov L.G., Shersiyannikova I.V. Eksperimental'noye issledovaniye zhestkosti podrel'sovogo osnovaniya na rabotu i vzaimodeystviye elementov puti v zone styka [Experimental study of the influence of the rigidity of the under-rail foundation on the work and interaction of track elements in the joint zone] // Collection of scientific works of IrGUPS. Irkutsk: IrGUPS, 2002, P. 30-39.
- 6 Fedorov D.V., e.a., Sposob geometricheskikh opredeleniy parametrov stykovogo rel'sovogo puti [Method for determining the geometric parameters of the joints of a rail track]. Patent RF 2678521, 2019.
- 7 Ermolenko I.Yu. Ispol'zovaniye profilya puti gornogo uchastka VSZHD na silovoye vzaimodeystviye «koleso-rel's» s uchetom eksperimental'nykh parametrov vagona-laboratorii [Impact profile path mining area ESRR to power the wheel-rail interaction, taking into account the experimental laboratory car settings] // Proceeding of Irkutsk State Technical University. 2017, vol. 21, № 2, P. 170-180.
8. Resels A.P., Filatov E.V., Kovenkin D.A., Baranov T.M. Ispol'zovaniye prodol'nykh sil v poyezdakh na pod'yem naruzhnogo rel'sa na krivykh uchastkakh puti [The use of longitudinal forces in trains to lift the outer rail on curved sections of the track] // Modern Technologies. System Analysis. Modeling / 2020, Vol. 65, No. 1, pp. 75-84. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.1(65).75-84.
9. Altynnikov D.S., Kovenkin D.A. Opredeleniye poperechnykh napryazheniy v sheyke rel'sov v zavisimosti ot dinamicheskikh nagruzok na podkhodakh k mostam [Determination of transverse stresses in the neck of the rails depending on the dynamic loads on the approaches to the bridges] // Modern Technologies. System Analysis. Modeling / 2018, Vol. 60, No. 4, pp. 108-107. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.4(60).108-117.
10. Spirov A.V., Bykov V.A. Modelirovaniye tormozheniya dlinnosostavnykh poyezdov s tsel'yu obespecheniya bezopasnosti dvizheniya [Modeling the braking of long-train trains to assess the safety of movement] // Computer modeling in railway transport: dynamics, strength, wear: III scientific and technical seminar / Bryansk: BGTU, 2016, pp. 84-87.

Информация об авторах

Ермоленко Игорь Юрьевич – к.т.н., доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: ermolenko_iy@list.ru

Information about the author

Igor Yurievich Ermolenko – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the department «Cars and carriage facilities», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: ermolenko_iy@list.ru